80%赖氨酸硫酸盐与98%赖氨酸盐酸盐对生长中期草鱼生长性能、消化吸收能力和消化器官生长发育影响的比较研究[1]

胡 凯[1,2] 苏玥宁[1] 冯 琳[1,3,4] 刘 扬[1,3,4] 姜维丹[1,3,4] 吴 培[1,3,4] 姜 俊[1,3,4] 周小秋[1,3,4*]

（1.四川农业大学动物营养研究所，成都 611130；2.成都农业科技职业学院畜牧兽医分院，成都 611130；3.鱼类营养与安全生产四川省高校重点实验室，成都 611130；4.动物抗病营养教育部重点实验，成都 611130）

摘 要：本试验通过比较80%赖氨酸硫酸盐[80% *L*-Lys·H_2SO_4，简称80赖氨酸（80-Lys）]与98%赖氨酸盐酸盐[98% *L*-Lys·HCl，简称98赖氨酸(98-Lys)]对生长中期草鱼生长性能、消化吸收能力和消化器官生长发育的影响，探讨80-Lys和98-Lys在草鱼上的生物效价并确定以80-Lys为Lys添加形式时饲料中Lys的适宜含量。选择初始体重为275.80 g左右的健康草鱼540尾，随机分成6组（每组3重复，每重复30尾鱼），分别饲喂赖氨酸（Lys）含量为0.8%（基础饲料）、1.0%、1.2%、1.4%和1.6%的添加80-Lys的饲料及Lys含量为1.2%的添加98-Lys的饲料60 d。结果表明：与基础饲料相比，饲料中添加适宜水平的80-Lys使饲料Lys含量达到1.2%时可显著提高生长中期草鱼的增重率（WGR），特定生长率（SGR），采食量（FI），全肠脂肪酶、淀粉酶活力，肝胰脏谷草转氨酶（GOT）和谷丙转氨酶(GPT)活力，前、中、后肠碱性磷酸酶（AKP）、肌酸激酶（CK）活力，肝体指数与肠体指数和前、后肠皱襞高度（$P<0.05$），显著降低血清GOT和GPT活力（$P<0.05$），且80-Lys对上述指标的作用效果显著优于98-Lys（$P<0.05$）；此外，还可显著提高生长中期草鱼的饲料效率（FE），全肠胰蛋白酶活力，前、中、后肠Na^+,K^+-ATP酶（Na^+,K^+-ATPase）和γ-谷胺酰转肽酶（γ-GT）活力，肠长与肠长指数以及中肠皱襞高度（$P<0.05$），但80-Lys对上述指标的作用效果与98-Lys差异不显著（$P>0.05$）。由此得出，与98-Lys相比，80-Lys能更有效地提高生长中期草鱼的消化吸收能力，进而促进其生长。以80-Lys为Lys添加形式，以SGR和FE为标识，生长中期草鱼（276～667 g）饲料中赖氨酸的最适含量分别为1.31%（占饲料蛋白质的4.68%）和1.27%（占饲料蛋白质的4.54%）。

收稿日期：2017-05-05

基金项目：四川省重大科技成果转化示范（2015CC0011）；四川省青年创新团队（2017TD0002）

作者简介：胡 凯（1981-），男，四川雅安人，博士，从事动物营养与饲料科学研究。E-mail: linaturehu@126.com

*通信作者：周小秋，教授，博士生导师，E-mail: zhouxq@sicau.edu.cn

关键词：80%赖氨酸硫酸盐；98%赖氨酸盐酸盐；草鱼；生长性能；消化吸收能力

中图分类号：S963　　文献标识码：A　　文章编号：

赖氨酸（lysine，Lys）是草鱼（*Ctenopharyngodon idella*）等多种重要经济养殖鱼类的必需氨基酸，缺乏将显著降低鱼类的生产性能[1-5]。外源添加氨基酸是弥补植物蛋白质源中 Lys 等必需氨基酸缺乏、保障饲料氨基酸平衡、维持动物正常生长、开拓蛋白质饲料资源的有效途径[6]，但鱼类对合成氨基酸的利用与其种类及氨基酸的添加形式有关[7]。赖氨酸盐酸盐[*L*-Lys·HCl，如 98% *L*-Lys·HCl（简称 98-Lys，Lys 含量≥78%）]和赖氨酸硫酸盐[*L*-Lys·H_2SO_4，如 65% *L*-Lys·H_2SO_4（Lys 含量≥51%）和 70% *L*-Lys·H_2SO_4（Lys 含量≥55%）、Biolys60（Lys 含量≥46.8%）以及 Biolys™（Lys 含量≥50.7%）]是饲料级商品赖氨酸的 2 种主要形式[8-9]。目前，关于 *L*-Lys·H_2SO_4 和 *L*-Lys·HCl 在动物上应用的比较研究仅有一些零星报道，且其研究所得作用效果存在差异。*L*-Lys·H_2SO_4 和 *L*-Lys·HCl 在斑点叉尾鮰[10]、虹鳟[11]、猪[12]和肉鸡[13]上的生物学效价相当，而 *L*-Lys·HCl 对斑节对虾生长的影响则优于 *L*-Lys·H_2SO_4[9]。这些结果表明，不同动物对 *L*-Lys·H_2SO_4 和 *L*-Lys·HCl 的利用效果可能存在差异。80% *L*-Lys·H_2SO_4（简称 80-Lys，Lys 含量≥63%）是我国近年成功开发的一种新型 *L*-Lys·H_2SO_4，比 *L*-Lys·HCl 的生产更环保且成本低廉。然而，关于 80-Lys 在动物上的应用研究仅有 1 篇在猪[8]上的报道。鱼类由于其生活在水中的特殊生活环境，其氨基酸的吸收利用等生理功能与陆生动物存在较大差异。Anderson 等[14]报道，猪饲粮中 Lys 的吸收与精氨酸（Arg）存在拮抗作用，在黑鲷[6]上的研究结果与在猪[14]上的研究结果相似。然而，Alam 等[15]研究发现，饲料中的 Arg 对牙鲆幼鱼 Lys 的吸收利用没有产生显著影响。因此，80-Lys 对鱼类的影响是否与猪一致还不清楚，需要研究。草鱼是我国广泛养殖的大宗淡水品种之一，占水产养殖总量的 20%以上[16]。目前，关于 80-Lys（新型 *L*-Lys·H_2SO_4）对草鱼生长性能、消化吸收能力及消化器官生长发育的影响及其与 98-Lys 的比较研究还未见报道。因此，本试验旨在探讨 80-Lys 在草鱼饲料中的添加效应、适宜添加量和可能的作用方式，比较 80-Lys 和 98-Lys 的生物效价，为新型 Lys 在淡水鱼养殖上的应用提供部分参考。

1　材料与方法

1.1　试验设计与试验饲料配制

试验用 80-Lys 和 98-Lys 均由长春大成实业集团有限公司提供。以大米蛋白粉、豆粕、棉籽粕、菜籽粕为主要蛋白质源配制基础饲料，向基础饲料中添加 80-Lys 使试验饲料中 Lys 含量分别为 0.8%（基础饲料）、1.0%、1.2%、1.4%和 1.6%，向基础饲料中添加 98-Lys 使试验饲料中 Lys 含量为 1.2%（满足草鱼生长需要[17]）。所有饲料通过添加甘氨酸（Gly）平衡蛋白质水平，试验饲料组成及营养水平见表 1。参考 Feng 等[18]的方法分析试验饲料氨基酸组成，列于表 2。

表 1　试验饲料组成及营养水平（风干基础）

Table 1　Composition and nutrient levels of experimental diets （air-dry basis）　%

项目 Items	Lys 含量 Lys content/%					
	80-Lys 组 80-Lys groups					98-Lys 组 98-Lys group
	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.2
原料 Ingredients						
大米蛋白粉 Rice gluten meal	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50
豆粕 Soybean meal	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
棉籽粕 Cottonseed meal	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
菜籽粕 Rapeseed meal	14.40	14.40	14.40	14.40	14.40	14.40
面粉 Wheat flour	41.13	41.13	41.13	41.13	41.13	41.13
鱼油 Fish oil	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23
豆油 Soybean oil	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78
羧甲基纤维素 Carboxymethyl cellulose	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
磷酸二氢钙 $Ca(H_2PO_4)_2$	3.10	3.10	3.10	3.10	3.10	3.10
维生素预混料 Vitamin premix1)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

矿物质预混料 Mineral premix1)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
赖氨酸预混料 Lys premix2)	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
蛋氨酸 Met （98%）	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31
氯化胆碱 Choline chloride （60%）	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
乙氧基喹啉 Ethoxyquin （30%）	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
合计 Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels3)						
粗蛋白质 CP	27.99	27.94	27.89	27.83	27.78	27.91
粗脂肪 EE	6.05	6.05	6.05	6.05	6.05	6.05
n-3 多不饱和脂肪酸 n-3 PUFA	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
n-6 多不饱和脂肪酸 n-6 PUFA	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
有效磷 AP	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84

1)维生素预混料和矿物质预混料均参照 Xu 等[19]配制。Vitamin premix and mineral premix were prepared according to Xu, et al[19].

2)每千克赖氨酸预混料中含有 Contained the following per kg of lysine premix：80 赖氨酸 80-Lys，0（0.8% 80-Lys 组 0.8% 80-Lys group）、59.55（1.0% 80-Lys 组 1.0% 80-Lys group）、119.10（1.2% 80-Lys 组 1.2% 80-Lys group）、178.65（1.4% 80-Lys 组 1.4% 80-Lys group）、238.20（1.6% 80-Lys 组 1.6% 80-Lys group）、0 g（1.2% 98-Lys 组 1.2% 98-Lys group）；98 赖氨酸 98-Lys，0（0.8% 80-Lys 组 0.8% 80-Lys group）、0（1.0% 80-Lys 组 1.0% 80-Lys group）、0（1.2% 80-Lys 组 1.2% 80-Lys group）、0（1.4% 80-Lys 组 1.4% 80-Lys group）、0（1.6% 80-Lys 组 1.6% 80-Lys group）、101.88 g（1.2% 98-Lys 组 1.2% 98-Lys group），甘氨酸 Gly 165.13（0.8% 80-Lys 组 0.8% 80-Lys group）、123.85（1.0% 80-Lys 组 1.0% 80-Lys group）、82.57（1.2% 80-Lys 组 1.2% 80-Lys group）、41.28（1.4% 80-Lys 组 1.4% 80-Lys group）、0（1.6% 80-Lys 组 1.6% 80-Lys group）、82.56 g（1.2% 98-Lys 组 1.2% 98-Lys group）；其余用玉米淀粉补足 the rest was corn gluten meal。

3)粗蛋白质为测定值，其他营养水平根据 NRC（2011）[17]饲料分析值计算得出。CP was a measured value, while the other nutrient levels were calculated according to feed analysis values of NRC (2011)[17].

表 2　试验饲料粮氨基酸组成

Table 2　Amino acid composition of experimental diets　　%

氨基酸 Amino acids	Lys 含量 Lys content/%					
	80-Lys 组 80-Lys groups					98-Lys 组 98-Lys group
	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.2
必需氨基酸 Essential amino acids						
赖氨酸 Lys	0.73	0.91	1.13	1.28	1.62	1.15
苏氨酸 Thr	1.02	1.03	1.03	1.01	1.00	1.01
蛋氨酸 Met	0.89	0.87	0.90	0.87	0.86	0.89
精氨酸 Arg	2.10	2.15	2.11	2.14	2.04	2.13
亮氨酸 Leu	1.46	1.55	1.45	1.43	1.43	1.45
苯丙氨酸 Phe	1.33	1.36	1.32	1.34	1.32	1.32
异亮氨酸 Iso	1.52	1.62	1.57	1.58	1.60	1.58
组氨酸 His	0.68	0.69	0.66	0.70	0.68	0.68
色氨酸 Try	0.31	0.37	0.35	0.35	0.38	0.34
缬氨酸 Val	1.54	1.57	1.55	1.56	1.53	1.53
非必需氨基酸 Non-essential amino acids						
谷氨酸 Glu	5.66	5.68	5.66	5.64	5.62	5.65
半胱氨酸 Cys	0.58	0.58	0.57	0.55	0.56	0.56

脯氨酸 Pro	2.18	2.19	2.20	2.18	2.14	2.12
天门冬氨酸 Asp	2.16	2.18	2.22	2.20	2.23	2.23
丝氨酸 Ser	1.44	1.44	1.38	1.38	1.42	1.40
丙氨酸 Ala	1.46	1.49	1.48	1.40	1.49	1.46
酪氨酸 Tyr	1.15	1.13	1.14	1.16	1.15	1.17
甘氨酸 Gly	1.84	1.71	1.57	1.43	1.29	1.52

1.2 饲养试验

饲养试验在四川农业大学水生动物营养研究室大邑研究基地进行，采用网箱养殖。草鱼购回经 4 周驯养后开始正式饲养试验。选择初始体重为（275.80±0.64） g 的健康草鱼 540 尾，随机分成 6 组，每组 3 个重复，每个重复 30 尾鱼，以重复为单位放入 1.4 m×1.4 m×1.4 m 的网箱中，组间初始体重差异不显著（P>0.05）。各组分别饲喂添加 80-Lys 和 98-Lys 的饲料 60 d。饲养管理参照本实验室前期研究建立的管理模式[20]进行，即每天定点投喂 4 次，每次投喂 30 min 后收集剩料并烘干称重。定期观察草鱼健康状况、换水及常规杀虫杀菌。试验期间水温为（28±2） ℃，pH 维持在 7.2±0.2，养殖水体中溶解氧浓度大于 6 mg/L。

1.3 样品采集与指标测定

在生长试验起始和结束时分别以网箱为单位称量试验鱼体重，用以计算体增重（weight gain，WG）、增重率（weight gain rate，WGR）、特定生长率（specific growth rate，SGR）；记录每日投饵量，收集残饵并称重，用以计算采食量（feed intake，FI）、饲料效率（feed efficiency，FE）。正式试验期间记录各组试验鱼死亡数，用以计算成活率（SR，survival rate）。饲养试验结束后，每组随机选择 15 尾生长中期草鱼，参照 Geraylou 等[21]描述的方法用对氨基苯甲酸对试验鱼进行麻醉，随后参考 Huang 等[22]描述的方法对试验鱼称重、测量体长以及采血，迅速分离肝胰脏和肠道并称重，测量肠长后定位分离前、中、后肠，再用液氮速冻后及时送超低温冰箱（-80 ℃）保存，用于实验室分析。每组另随机选择 6 尾试验鱼，参照 Lin 等[23]描述的方法测量其肠道皱襞高度。全肠胰蛋白酶、糜蛋白酶、脂肪酶、淀粉酶活力，前、中、后肠碱性磷酸酶（alkaline phosphatase，AKP）、肌酸激酶（creatine kinase，CK）、Na^+，K^+-ATP 酶（Na^+，K^+-ATPase）、γ-谷胺酰转肽

酶（γ-glutamyltransferase，γ-GT）活力的测定均参照 Li 等[24]描述的方法进行。血清、肝胰脏谷草转氨酶（glutamic oxalacetic transaminase，GOT）和谷丙转氨酶（glutamate pyruvate transaminase，GPT）活力的测定参照唐凌等[25]描述的方法进行。

1.4 计算公式

WGR=[WG（g）/初始体重（g）]×100；

SGR={[ln 终末体重（g）-ln 初始体重（g）]/试验天数（d）}×100；

FI=总投饵量（g）-总残饵量（g）；

FE=[WG（g）/摄食量（g）]×100；

成活率={[初始鱼总数（尾）-死亡鱼数(尾)]/初始鱼总数（尾）}×100；

肝体指数（hepatosomatic index，HSI）=[肝胰脏重（g）/体重（g）]×100；

肠体指数（intestosomatic index，ISI）=[肠重（g）/体重（g）]×100；

肠长指数（relative gut length，RGL）=[肠长（cm）/体长（cm）]×100。

1.5 数据处理与统计分析

试验数据用平均值±标准差表示，采用 SPSS 18.0 统计软件进行统计分析。对不同 Lys 含量的 80-Lys 组的试验数据进行单因素方差分析，并结合 Duncan 氏法进行多重比较，以 P<0.05 作为差异显著水平，对统计学差异显著的指标进行回归分析。对饲料中 Lys 含量相同的 80-Lys（1.2% Lys）组与 98-Lys（1.2% Lys）组试验数据进行 t 检验，以检验不同处理之间的差异显著性，差异显著水平为 P<0.05。

2 结 果

2.1 80-Lys 和 98-Lys 对生长中期草鱼生长性能的影响

由表 33 可知，饲喂添加 80-Lys 和 98-Lys 的饲料的生长中期草鱼的 SR 均为 100%。生长中期草鱼的终末体重、WG、WGR、SGR、FI、FE 先随着饲料中 80-Lys 添加水平的增加而显著升高（P<0.05），在饲料中 Lys 含量为 1.2%时均达到最大值，而后均随着饲料中 80-Lys 添加水平的进一步增加而显著降低（P<0.05）。在饲料中 Lys 含量均为 1.2%的条件下，80-Lys 组与 98-Lys 组相比，生长中期草鱼的 FBW、WG、WGR、

SGR、FI 均显著升高（P<0.05），而 FE 和成活率则差异不显著（P>0.05）。

以 80-Lys 作为 Lys 的添加形式，分别对饲料中 Lys 含量（x）和生长中期草鱼的 WG（y_{WG}）、WGR（y_{WGR}）、SGR（y_{SGR}）、FI（y_{FI}）、FE（y_{FE}）进行回归分析，得到的回归方程分别为 $y_{WG}=-431.56x^2+1132.06x-367.88$($R^2$=0.869，$P$<0.01)、$y_{WGR}=-157.13x^2+412.08x-134.38$($R^2$=0.867，$P$<0.01)、$y_{SGR}=-1.2x^2+3.15x-0.64$($R^2$=0.884，$P$<0.01)、$y_{FI}=-370.6x^2+1009.99x-33.3$($R^2$=0.895，$P$<0.01)、$y_{FE}=-0.38x^2+0.97x-0.05$($R^2$=0.795，$P$<0.01)，分别以 SGR 和 FE 为标识，通过二次曲线分析确定的生长中期草鱼（276～667 g）的 Lys 最适含量分别为 1.31%和 1.27%(图 1)。

表 3　80-Lys 和 98-Lys 对生长中期草鱼生长性能的影响

Table 3　Effects of 80-Lys and 98-Lys on growth performance of young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)

项目 Items	Lys 含量 Lys content/%					
	80-Lys 组 80-Lys groups					98-Lys 组 98-Lys group
	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.2
终末体重 FBW/（g/尾）	541.46±9.19[a]	593.67±7.10[b]	666.89±8.23[dB]	632.64±5.66[c]	618.13±10.53[c]	642.60±10.35[A]
增重 WG/（g/尾）	265.46±8.73[a]	317.44±7.26[b]	391.33±8.51[dB]	356.75±5.49[c]	342.13±10.51[c]	367.49±10.54[A]
增重率 WGR/%	96.18±3.01[a]	114.93±2.73[b]	142.02±3.24[dB]	129.31±1.91[c]	123.96±3.82[c]	133.58±3.96[A]
特定生长率 SGR/（%/d）	1.12±0.03[a]	1.28±0.02[b]	1.47±0.02[dB]	1.38±0.01[c]	1.34±0.03[c]	1.41±0.03[A]

采食量 FI/（g/尾）	543.17±3.35[a]	587.56±10.01[b]	666.69±2.63[dB]	643.96±2.60[c]	635.52±1.01[c]	641.38±5.13[A]
饲料效率 FE	0.49±0.01[a]	0.54±0.02[b]	0.59±0.01[c]	0.55±0.01[b]	0.54±0.02[b]	0.57±0.01
成活率 SR/%	100.00±0.00	100.00±0.00	100.00±0.00	100.00±0.00	100.00±0.00	100.00±0.00

同行数据肩标不同小写字母表示 80-Lys 组间差异显著（$P < 0.05$），肩标不同大写字母表示 80-Lys（1.2% Lys）组与 98-Lys（1.2% Lys）组差异显著（$P < 0.05$）。下表同。

In the same row, values with different small letter superscripts are significantly different among 80-Lys groups ($P<0.05$), and with different capital letter superscripts are significantly different between the 80-Lys (1.2% Lys) group and 98-Lys (1.2% Lys) group ($P<0.05$). The same as below.

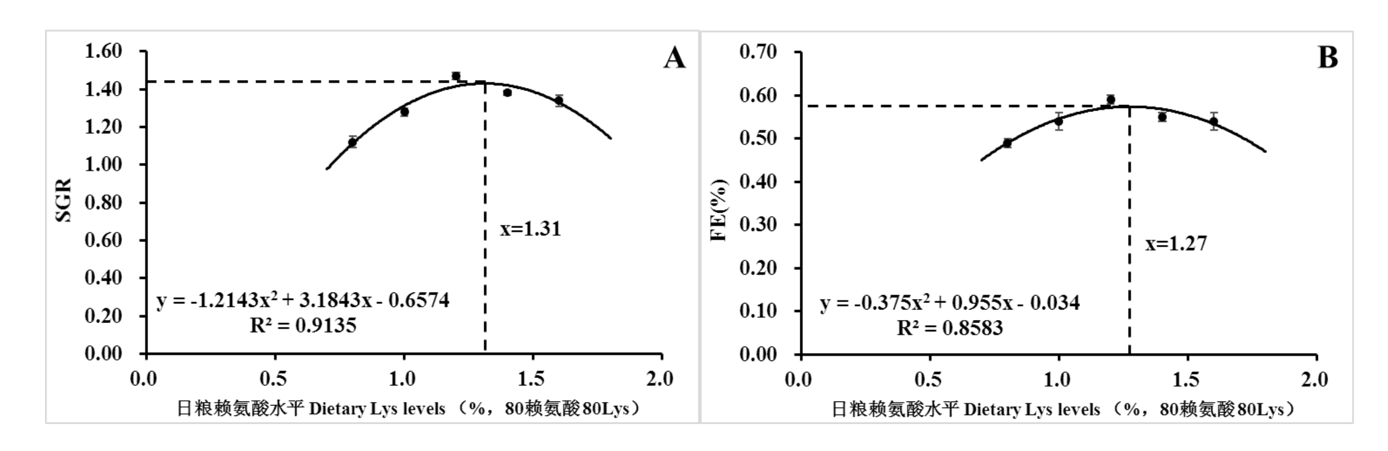


图 1　饲料中 Lys 含量（以 80-Lys 作为 Lys 的添加形式）与生长中期草鱼特定生长率（A）或饲料效率（B）的二次曲线分析

Fig.1　Quadratic regression analysis of dietary Lys content （80-Lys as the supplemental form of Lys） and SGR （A） or FE （B） of young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)

2.2　80-Lys 和 98-Lys 对生长中期草鱼全肠消化酶活力的影响

由表 4 可知，饲料中添加不同水平的 80-Lys 对生长中期草鱼全肠糜蛋白酶活力的影响不显著（$P>0.05$）。

随饲料中 80-Lys 添加水平的增加，生长中期草鱼全肠胰蛋白酶活力先显著升高（*P*<0.05），在饲料中 Lys 含量为 1.2%时达到最大值，而后随着饲料中 80-Lys 添加水平的进一步增加而显著降低（*P*<0.05）。不同添加水平的 80-Lys 对生长中期草鱼全肠脂肪酶和淀粉酶活力的影响与胰蛋白酶相似。在饲料中 Lys 含量均为 1.2%的条件下，80-Lys 组与 98-Lys 组相比，生长中期草鱼全肠脂肪酶和淀粉酶活力显著升高（*P*<0.05），而糜蛋白酶活力则显著降低（*P*<0.05），胰蛋白酶活力差异不显著（*P*>0.05）。

表 4　80-Lys 和 98-Lys 对生长中期草鱼肠道消化酶活力的影响

Table 4　Effects of 80-Lys and 98-Lys on digestive enzyme activities in total intestine of young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)　U/g

项目 Items	Lys 含量 Lys content/%					
	80-Lys 组 80-Lys groups					98-Lys 组 98-Lys group
	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.2
胰蛋白酶 Trypsin	1.02±0.08^{a}	1.28±0.09^{b}	1.45±0.14^{c}	1.30±0.09^{b}	1.22±0.11^{b}	1.51±0.13
糜蛋白酶 Chymotrypsin	11.46±1.23	12.42±1.01	11.78±1.23^{B}	11.94±0.94	12.47±0.87	18.10±1.20^{A}
脂肪酶 Lipase	601.95±113.42^{a}	879.77±113.42^{bc}	1 296.50±143.47^{dB}	972.37±152.17^{c}	787.16±113.42^{b}	1 064.98±113.42^{A}
淀粉酶 Amylase	990.02±24.84^{ab}	1 017.96±21.92^{bc}	1 053.60±12.89^{dB}	1 012.63±21.26^{bc}	985.96±13.81^{a}	1 011.80±37.94^{A}

2.3　80-Lys 和 98-Lys 对生长中期草鱼肠道刷状缘酶活力的影响

由表 4 可知，生长中期草鱼前、中、后肠 AKP 活力先随饲料中 80-Lys 添加水平的增加而显著升高

（P<0.05），均在饲料中 Lys 含量为 1.2%时达到最大值，而后随着饲料中 80-Lys 添加水平的进一步增加而显著降低（P<0.05）。饲料中添加不同水平的 80-Lys 对生长中期草鱼前、中、后肠 CK 活力，中、后肠 γ-GT 活力影响的变化趋势与前、中、后肠 AKP 相似。1.2% 80-Lys 组生长中期草鱼前、中肠 Na^+,K^+-ATPase 活力均显著高于 0.8%（基础饲料组）、1.4%和 1.6% 80-Lys 组（P<0.05），但与 1.0% 80-Lys 组差异不显著（P>0.05）。1.2% 80-Lys 组生长中期草鱼后肠 Na^+,K^+-ATPase 活力与前肠 γ-GT 活力显著高于 0.8%、1.0%和 1.6% 80-Lys 组（P<0.05），但与 1.4% 80-Lys 组差异不显著（P>0.05）。在饲料中 Lys 含量均为 1.2%的条件下，80-Lys 组与 98-Lys 组相比，生长中期草鱼前、中、后肠 AKP 和 CK 活力均显著升高（P<0.05），而前、中、后肠 Na^+,K^+-ATPase 和 γ-GT 活力则差异不显著（P>0.05）。

以 80-Lys 作为 Lys 的添加形式，分别对饲料中 Lys 含量（x）和生长中期草鱼的前（y_{AKPPI}）、中（y_{AKPMI}）、后肠 AKP 活力（y_{AKPDI}），后肠 CK 活力（y_{CKDI}）以及中（$y_{\gamma\text{-GTMI}}$）、后肠 γ-GT 活力（$y_{\gamma\text{-GTDI}}$）进行回归分析，得到的回归方程分别为 $y_{AKPPI}=-453.81x^2+1\ 077.45x-487.36$（$R^2=0.910$，$P<0.01$）、$y_{AKPMI}=-612.86x^2+1\ 499.27x-765.68$（$R^2=0.971$，$P<0.01$）、$y_{AKPDI}=-285.55x^2+692.07x-352.23$（$R^2=0.740$，$P<0.01$）、$y_{CKDI}=-154.54x^2+353.64x-96.88$（$R^2=0.709$，$P<0.01$）、$y_{\gamma\text{-GTMI}}=-185.1x^2+469.02x-201.25$（$R^2=0.748$，$P<0.01$）、$y_{\gamma\text{-GTDI}}=-225.14x^2+574.93x-275.62$（$R^2=0.716$，$P<0.01$）。

表 5　80-Lys 和 98-Lys 对生长中期草鱼肠道刷状缘酶活力的影响

Table 5　Effects of 80-Lys and 98-Lys on brush-border enzyme activities in intestine of young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)　U/g

项目 Items	Lys 含量 Lys content/%					
	80-Lys 组 80-Lys groups					98-Lys 组 98-Lys group
	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.2
碱性磷酸酶 AKP						
前肠 PI	85.23±7.54[a]	136.03±5.09[c]	164.41±4.62[dB]	119.40±7.34[b]	81.27±6.30[a]	129.02±2.47[A]

中肠 MI	46.07±2.87^{a}	111.59±4.28^{c}	161.41±3.08^{eB}	130.69±3.25^{d}	64.52±4.53^{b}	142.37±3.24^{A}
后肠 DI	21.54±1.97^{a}	44.02±1.88^{c}	84.93±1.32^{dB}	44.47±2.78^{c}	28.16±2.12^{b}	47.91±3.60^{A}
肌酸激酶 CK						
前肠 PI	160.30±14.11^{a}	180.58±12.32^{bc}	210.55±18.78^{dB}	189.82±10.88^{c}	169.86±8.48^{ab}	186.82±11.19^{A}
中肠 MI	150.92±12.67^{a}	178.94±15.11^{b}	198.60±16.51^{cB}	177.89±15.52^{b}	160.67±12.00^{a}	180.11±9.31^{A}
后肠 DI	88.21±6.76^{b}	97.61±7.04^{c}	109.17±7.53^{dB}	89.65±8.81^{bc}	75.68±4.83^{a}	95.35±4.84^{A}
Na^+,K^+-ATP 酶 Na^+,K^+-ATPase						
前肠 PI	160.72±7.35^{bc}	166.23±12.70^{cd}	173.80±7.94^{d}	161.80±9.00^{ab}	145.99±6.97^{a}	169.26±11.46
中肠 MI	201.68±16.90^{a}	227.69±17.82^{bc}	241.18±7.70^{c}	221.54±5.77^{b}	196.31±12.84^{a}	247.78±6.72
后肠 DI	175.81±20.79^{a}	189.15±13.63^{a}	233.09±20.84^{c}	214.69±23.19^{bc}	197.59±17.89^{ab}	237.96±14.74
γ-谷胺酰转肽酶 γ-GT						
前肠 PI	98.63±6.75^{a}	112.46±11.31^{bc}	134.84±12.88^{d}	123.75±10.52^{cd}	103.86±7.86^{ab}	126.20±11.79
中肠 MI	60.39±5.72^{a}	73.53±7.34^{b}	107.11±9.42^{d}	86.43±7.67^{c}	75.16±6.12^{b}	98.97±3.88
后肠 DI	44.95±4.93^{a}	59.31±4.72^{b}	103.43±9.57^{e}	85.99±5.23^{d}	68.27±5.10^{c}	96.61±6.38

2.4 80-Lys 和 98-Lys 对生长中期草鱼血清、肝胰脏 GOT 和 GPT 活力的影响

由表 6 可知，生长中期草鱼血清 GOT 和 GPT 活力随饲料中 80-Lys 添加水平的增加先降低后升高，在饲料中 Lys 含量为 1.2%时其血清 GOT 和 GPT 活力最低，其中 GOT 活力显著低于其他各组（P<0.05），GPT 活力显著低于除 1.0% 80-Lys 组外的其他各组（P<0.05）。饲料中添加不同水平的 80-Lys 对生长中期草鱼肝胰脏 GPT 活力影响的变化趋势与血清 GOT 和 GPT 活力的变化趋势相反，以 1.2% 80-Lys 组肝胰脏 GPT 活力最高，显著高于其他各组（P<0.05）。1.2%和 1.4% 80-Lys 组生长中期草鱼肝胰脏 GOT 活力显著高于 0.8%、1.0%和 1.6% 80-Lys 组（P<0.05），且 1.2%和 1.4% 80-Lys 组间差异不显著（P>0.05）。在饲料中 Lys 含量均为 1.2%的条件下，80-Lys 组与 98-Lys 组相比，生长中期草鱼血清 GOT 和 GPT 活力均显著降低（P<0.05），而肝胰脏 GOT 和 GPT 活力则显著升高（P<0.05）。

以 80-Lys 作为 Lys 的添加形式，分别对饲料中 Lys 含量（x）和生长中期草鱼的肝胰脏（$y_{肝胰脏GOT}$）和血清 GOT 活力($y_{血清GOT}$)进行回归分析，得到的回归方程分别为 $y_{肝胰脏GOT}$=-9.077x^2+22.851x-7.002(R^2=0.751，P<0.01)、$y_{血清GOT}$=5.119x^2-12.069x+8.289（R^2=0.786，P<0.01）。

表 6　80-Lys 和 98-Lys 对生长中期草鱼血清、肝胰脏 GOT 和 GPT 活力的影响

Table 6　Effects of 80-Lys and 98-Lys on GOT and GPT activities in serum and hepatopancreas of young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)

项目 Items	Lys 含量 Lys content/%					
	80-Lys 组 80-Lys groups					98-Lys 组 98-Lys group
	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.2
血清 Serum/（U/mL）						
谷草转氨酶 GOT	1.85±1.50[c]	1.45±1.15[b]	0.96±0.65[aA]	1.56±1.36[b]	2.03±1.70[d]	1.33±0.71[B]
谷丙转氨酶 GPT	0.79±0.56[b]	0.67±0.63[a]	0.63±0.62[aA]	0.83±0.67[bc]	0.89±0.70[c]	0.88±0.80[B]
肝胰脏 Hepatopancreas/（U/mg）						
谷草转氨酶 GOT	5.61±2.42[a]	6.45±5.10[b]	7.48±1.98[cB]	8.49±6.91[c]	6.22±4.19[b]	6.41±4.04[A]
谷丙转氨酶 GPT	6.04±2.04[a]	6.19±4.42[a]	7.03±5.51[bB]	5.77±4.51[a]	5.59±2.45[a]	6.06±3.07[A]

2.5　80-Lys 和 98-Lys 对生长中期草鱼肝胰脏和肠道生长发育的影响

由表 77 可知，生长中期草鱼肝胰脏重随饲料中 80-Lys 添加水平的增加先升高后降低，在饲料中 Lys 含量为 1.2%时达到最高值，显著高于其他各组（P<0.05）。饲料中添加不同水平的 80-Lys 对生长中期草鱼肠长、

肠长指数、肠重、肠体指数以及前、中、后肠皱襞高度影响的变化趋势与肝胰脏重相似。1.2% 80-Lys 组生长中期草鱼肝体指数显著高于 0.8%、1.4%和 1.6% 80-Lys 组（P<0.05），但与 1.0% 80-Lys 组差异不显著（P>0.05）。在饲料中 Lys 含量均为 1.2%的条件下，80-Lys 组与 98-Lys 组相比，生长中期草鱼肝胰脏重、肝体重指数、肠重、肠体指数以及前、中、后肠皱襞高度均显著升高（P<0.05），而肠长、肠长指数则差异不显著（P>0.05）。

以 80-Lys 作为 Lys 的添加形式，分别对饲料中 Lys 含量（x）和生长中期草鱼的肝胰脏重（$y_{肝胰脏重}$）、肠重（$y_{肠重}$）以及前（$y_{前肠皱襞高度}$）、中（$y_{中肠皱襞高度}$）、后肠皱襞高度（$y_{后肠皱襞高度}$）进行回归分析，得到的回归方程分别为 $y_{肝胰重}$=-33.67x^2+86.87x-35.32（R^2=0.769，P<0.01）、$y_{肠重}$=-40.92x^2+101.02x-45.91（R^2=0.795，P<0.01）、$y_{前肠皱襞高度}$=-2 041.28x^2+4 946.26x-1 691.77（R^2=0.771，P<0.01）、$y_{中肠皱襞高度}$=-1 070.57x^2+2 616.35x-462.67（R^2=0.790，P<0.01）、$y_{后肠皱襞高度}$=-1 451.31x^2+3 558.72x-1 128.55（R^2=0.753，P<0.01）。

表 7　80-Lys 和 98-Lys 对生长中期草鱼肝胰脏和肠道生长发育的影响

Table 7　Effects of 80-Lys and 98-Lys on growth development of hepatopancreas and intestine of young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)

项目 Items	Lys 含量 Lys content/%					
	80-Lys 组 80-Lys groups					98-Lys 组 98-Lys group
	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.2
肝胰脏重 Hepatopancreatic weight/（g/尾）	12.55±0.76[a]	17.64±1.29[b]	21.71±1.53[cB]	18.89±1.74[b]	18.17±1.47[b]	19.42±1.85[A]
肝体指数 HSI/%	2.96±0.25[a]	3.23±0.17[ab]	3.37±0.28[bB]	3.02±0.23[a]	2.97±0.30[a]	3.11±0.20[A]
肠重 Intestinal	8.47±0.75[a]	14.48±1.34[c]	17.73±1.61[dB]	13.74±1.27[c]	11.58±1.14[b]	14.37±1.34[A]

weight/（g/尾）						
肠体指数 ISI/%	1.90±0.16^{a}	2.59±0.22^{c}	2.81±0.16^{dB}	2.16±0.17^{b}	1.95±0.14^{a}	2.32±0.18^{A}
肠长 Intestinal length/（cm/尾）	50.13±2.69^{a}	56.36±3.24^{b}	63.45±2.98^{c}	58.39±4.49^{b}	56.36±2.79^{b}	60.53±4.57
肠长指数 RGL/%	171.98±9.93^{a}	184.20±9.19^{ab}	200.13±9.25^{c}	188.16±16.23^{b}	178.37±8.54^{ab}	189.66±12.72
皱襞高度 Fold height/μm						
前肠 PI	961.80±25.84^{a}	1 171.03±24.78^{d}	1 413.06±16.51^{eB}	1 129.29±16.68^{c}	1 029.87±36.56^{b}	1 395.15±24.36^{A}
中肠 MI	931.89±23.93^{a}	1 099.66±11.82^{d}	1 165.83±24.68^{eB}	1 044.70±21.76^{c}	1 006.36±20.96^{b}	1 174.48±27.24^{A}
后肠 DI	805.23±16.93^{a}	918.80±9.98^{c}	1 138.42±12.43^{eB}	953.99±29.43^{d}	863.22±25.40^{b}	1 054.34±51.94^{A}

3 讨 论

3.1 80-Lys 对生长中期草鱼生长性能的影响及其与 98-Lys 的比较研究

Lys 是鱼类重要的必需氨基酸[26]。本试验结果表明：饲料中 80-Lys 的添加显著提高了生长中期草鱼的终末体重、WG、WGR 和 SGR，且饲料中 Lys 含量与生长中期草鱼的生长指标呈显著二次相关，说明添加适宜水平的 80-Lys 可以促进生长中期草鱼的生长。此外，与 98-Lys 比较，在饲料 Lys 含量均为 1.2%的条件下，80-Lys 对生长中期草鱼的促生长作用优于 98-Lys。虽然目前未见 80-Lys 在鱼类上的研究报道，但本试验结果与其他形式 Lys 在其他生长阶段草鱼或其他鱼上的研究结果类似，如生长后期草鱼（*L*-Lys·H_2SO_4，Lys 含量=51%）[1]、草鱼幼鱼（晶体 *L*-Lys）[27-28]、建鲤（*Cyprinus carpio* var. Jian，包被 Lys，Lys 含量=70.04%）

[2]、尼罗罗非鱼（*L*-Lys）[5]、太平洋鲅（*Polydactylus sexfilis*，*L*-Lys）[3]、石斑鱼（*Epinephelus coioides*，*L*-Lys·HCl）[29]、大菱鲆(*Scophthalmus maximus*，*L*-Lys·HCl)[30]、大黄鱼（*Pseudosciaena crocea* R.，*L*-Lys·HCl）[4]等。然而，关于饲料中添加晶体 *L*-Lys 对草鱼生长性能的影响也存在不一致的报道，有研究则显示饲料中添加晶体 *L*-Lys 对草鱼幼鱼终末体重及 WGR 没有显著影响[31]。其不一致的原因可能是由于本试验增加了投喂频率，提高了氨基酸吸收的同步性，进而提高了生长中期草鱼对 80-Lys 及 98-Lys 的利用效率。鱼类的生长依赖于营养物质的摄入，而饲料中必需氨基酸的含量与动物的 FI 密切相关[2,32]，因此，饲料中添加 80-Lys 的促生长作用可能与其调节鱼类 FI 有关。本研究结果表明：随着饲料中 80-Lys 添加水平的增加，生长中期草鱼的 FI 和 FE 先升高后降低，在饲料中 Lys 含量均为 1.2%时达到最大值。在饲料中 Lys 含量均为 1.2%的条件下，与 98-Lys 组比较，80-Lys 组生长中期草鱼的 FI 显著提高。Wang 等[27]在草鱼幼鱼上的研究结果与本试验有相似，即在饲料中添加适宜水平的晶体 *L*-Lys，草鱼幼鱼的 FE 显著提高。这些结果说明，80-Lys 可通过提高鱼类的 FI 和 FE 促进生长，且作用效果优于 98-Lys。以 80-Lys 为 Lys 添加形式，分别以 SGR 和 FE 为标识，生长中期草鱼（276～667 g）饲料中 Lys 的最适含量分别为 1.31%（占饲料蛋白质的 4.68%）和 1.27%（占饲料蛋白质的 4.54%）。

3.2 80-Lys 对生长中期草鱼消化吸收能力及机体和肝胰脏氨基酸代谢相关指标的影响及其与 98-Lys 的比较研究

鱼类消化吸收能力的强弱是影响鱼类 FI 和 FE 的重要因素[24]。鱼类肠道内消化酶的活力是反映鱼类消化能力的重要指标[33]。本试验结果表明：饲料中添加适宜水平的 80-Lys 可显著提高生长中期草鱼全肠胰蛋白酶、脂肪酶和淀粉酶的活力。在饲料中 Lys 含量均为 1.2%的条件下，与 98-Lys 比较，80-Lys 可显著提高生长中期草鱼全肠脂肪酶和淀粉酶活力，显著降低糜蛋白酶活力，胰蛋白酶活力则无显著变化。目前，关于 80-Lys 对鱼类消化能力影响的研究未见报道，但在其他形式的 Lys 上有相关报道。本实验室前期在 *L*-Lys·H_2SO_4（Lys 含量=51%）对生长后期草鱼肠道消化酶活力上的研究结果[1]与本试验结果相似。研究发现，饲料中添加适宜水平的 *L*-Lys·HCl 可显著提高鳡鱼（*Elopichthys bambusa*）幼鱼肠道蛋白酶活力[34]。但是，本试验中饲料中 80-Lys 添加水平对生长中期草鱼胰蛋白酶活力没有产生显著影响，与 *L*-Lys·H_2SO_4（Lys

含量=51%）在生长后期草鱼上的研究结果[1]存在差异。其可能原因为，本试验饲料基于商业饲料，其基础饲料中 Lys 含量（0.8%）可能已满足生长中期草鱼糜蛋白酶合成、分泌和酶原激活的需要。Lys 影响鱼类消化酶活力可能与消化酶的分泌和释放有关。在金黄色石斑鱼上的研究发现 Lys 可作为鱼类胰腺释放胰蛋白酶原的刺激物[35]。这些结果说明，80-Lys 可能比 98-Lys 能更有效地提高鱼类消化脂肪和淀粉的能力，进而比 98-Lys 能更有效地提高鱼类的 FI，促进生长。

鱼类肠道也是其营养物质吸收的主要场所，其对营养物质的吸收与肠道刷状缘酶活力密切相关[24]。AKP 是一种膜结合蛋白，可以分解正磷酸单酯为机体的磷代谢和核酸代谢提供磷酸基团，在生物体内分布广泛。分布于动物肠道上皮刷状缘细胞表面的肠型碱性磷酸酶（IAKP）与维生素 D、钙、氨基酸、胆固醇、脂类和葡萄糖等多种营养物质吸收有关[36-37]。CK 为催化肌酸和 ATP 偶联的促 ATP 生成酶，可为动物肠道内为营养物质的吸收提供能量[38]。Na^+，K^+-ATPase 直接影响动物肠道营养物质主动转运过程的能量供给，参与大多数氨基酸和葡萄糖的吸收[39]。γ-GT 是谷氨酸循环的关键酶，能促进氨基酸向细胞内转运，为蛋白质生物合成提供原料[40]。因此，常用肠道 AKP、CK、Na^+，K^+-ATPase 和 γ-GT 活力反映动物对营养物质的吸收能力。本试验结果表明，饲料中添加适宜水平的 80-Lys 可显著提高生长中期草鱼前、中、后肠 AKP、CK、Na^+，K^+-ATPase 和 γ-GT 活力，与本实验室前期以 *L*-Lys·H_2SO_4（Lys 含量=51%）作为 Lys 添加形式在生长后期草鱼上的研究结果[1]类似。然而，在饲料中 Lys 含量均为 1.2%的条件下，与 98-Lys 相比，80-Lys 仅显著提高了生长中期草鱼前、中、后肠 AKP 和 CK 活力。这些结果说明，80-Lys 可能通过提高鱼类肠道刷状缘酶 AKP 和 CK 活力增强其肠道对营养物质的吸收，且与 98-Lys 相比，80-Lys 更有效。

GOT 和 GPT 是鱼体内氨基酸代谢的重要酶类，鱼类肝脏 GOT 和 GPT 活力是反映鱼类肝脏氨基酸代谢的重要指标[41]。本试验结果表明，随着饲料中 80-Lys 添加水平的增加，生长中期草鱼肝胰脏 GOT 和 GPT 活力也随之提高，当饲料 Lys 含量分别为 1.4%和 1.2%时，生长中期草鱼肝胰脏 GOT 和 GPT 活力分别达到最高，说明饲料中适宜添加水平的 80-Lys 增强了生长中期草鱼肝脏氨基酸的代谢作用。此外，在饲料中 Lys 含量均为 1.2%的条件下，与 98-Lys 比较，80-Lys 提高了生长中期草鱼肝胰脏氨基酸的代谢作用。关于 Lys 对水生动物肝脏 GOT 和 GPT 活力影响的研究有少量报道。研究显示，饲料中添加适宜水平的 *L*-Lys •H_2SO_4

（Lys 含量=51%）可显著提高生长后期草鱼肝胰脏 GOT 活力[1]，饲料中添加适宜水平的 *L*-Lys 可显著提高三疣梭子蟹（*Portunus trituberculatus*）肝胰腺 GOT 和 GPT 活力[42]。在幼建鲤上的研究发现，肝胰脏 GOT 活力与鱼体蛋白质沉积率呈显著正相关[43]。徐静[44]研究表明，适宜水平的蛋白质可能通过增强生长中期草鱼肝胰脏氨基酸的代谢，提高其对饲料蛋白质的利用率。因此，80-Lys 可能比 98-Lys 能更有效地提高氨基酸的代谢，增强饲料蛋白质的利用率，进而促进鱼体生长，但其具体作用机制需要进一步研究。

3.3　80-Lys 对生长中期草鱼消化器官生长发育的影响及其与 98-Lys 的比较研究

肝胰脏和肠道是鱼类最重要的消化吸收及营养物质代谢器官，鱼类消化吸收能力及氨基酸代谢与其消化器官的生长发育密切相关。本试验结果表明，饲料中添加适宜水平的 80-Lys 能显著增加生长中期草鱼肝胰重、肝体指数、肠重、肠体脂数和肠长指数。此外，在饲料中 Lys 含量均为 1.2%的条件下，与 98-Lys 组相比，80-Lys 组生长中期草鱼肝胰重、肝体指数、肠重和肠体指数显著提高。在草鱼幼鱼上的研究发现，饲料添加适宜水平的晶体 *L*-Lys 后草鱼幼鱼的肝体指数显著提高[27]，与本试验结果相似。肠道皱襞高度是反映鱼类肠道生长发育及其肠道吸收面积的另一重要指标，与鱼类的吸收能力密切相关。本试验结果表明，饲料中添加适宜水平的 80-Lys 可显著提高生长中期草鱼前、中、后肠的皱襞高度，且在饲料中 Lys 含量均为 1.2%的条件下 80-Lys 组生长中期草鱼前、后肠的皱襞高度显著高于 98-Lys 组。此外，肝脏细胞结构功能正常是鱼类消化和营养物质代谢的重要保障[45]。细胞通透性变化是细胞损伤的标志之一，胞浆酶 GOT 和 GPT 释放量可以反映出胞内酶的渗漏性，为肝细胞受损的特征性酶谱[46]。本试验结果表明，饲料中添加适宜水平的 80-Lys 可显著降低生长中期草鱼血清 GOT 和 GPT 活力，且在饲料中 Lys 含量均为 1.2%的条件下，与 98-Lys 组相比，80-Lys 组生长中期草鱼血清 GOT 和 GPT 活力显著降低。相似的研究表明，饲料中添加适宜水平的 *L*-Lys • HCl 显著降低鳡鱼幼鱼血清 GOT 和 GPT 活力[34]。这些结果说明，80-Lys 可能比 98-Lys 能更有效地促进鱼类消化器官的生长发育，增加鱼类肠道吸收面积，保障鱼类肝脏细胞的结构功能正常，但其具体作用方式有待研究。

4　结　论

① 与 98-Lys 相比，80-Lys 能更有效地提高生长中期草鱼的生长性能。

② 与 98-Lys 相比，80-Lys 能更有效地保护生长中期草鱼肝胰脏结构完整性，增加肠道吸收面积，促进消化器官生长发育，提高消化吸收能力，进而增加 FI，促进其生长。

③ 以 80-Lys 作为 Lys 的添加形式，以 SGR 和 FE 为标识，生长中期草鱼（276～667 g）饲料中赖氨酸的最适含量分别为 1.31%（占饲料蛋白质的 4.68%）和 1.27%（占饲料蛋白质的 4.54%）。

参考文献：

[1] LI X Y,TANG L,HU K,et al.Effect of dietary lysine on growth,intestinal enzymes activities and antioxidant status of sub-adult grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J].Fish Physiology and Biochemistry,2014,40(3):659–671.

[2] ZHOU X Q,ZHAO C R,JIANG J,et al.Dietary lysine requirement of juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian)[J].Aquaculture Nutrition,2008,14(5):381–386.

[3] DENG D F,DOMINY W,JU Z Y,et al.Dietary lysine requirement of juvenile Pacific threadfin (*Polydactylus sexfilis*)[J].Aquaculture,2010,308(1/2):44–48.

[4] ZHANG C X,AI Q H,MAI K S,et al.Dietary lysine requirement of large yellow croaker,*Pseudosciaena crocea* R[J].Aquaculture,2008,283(1/2/3/4):123–127.

[5] MICHELATO M,DE OLIVEIRA VIDAL L,XAVIER T O,et al.Dietary lysine requirement to enhance muscle development and fillet yield of finishing Nile tilapia[J].Aquaculture,2016,457:124–130.

[6] ZHOU F,SHAO Q J,XIAO J X,et al.Effects of dietary arginine and lysine levels on growth performance,nutrient utilization and tissue biochemical profile of black sea bream,*Acanthopagrus schlegelii*,fingerlings[J].Aquaculture,2011,319(1/2):72–80.

[7] ZHOU X Q,ZHAO C R,LIN Y.Compare the effect of diet supplementation with uncoated or coated lysine on juvenile Jian Carp (*Cyprinus carpio* var. Jian)[J].Aquaculture Nutrition,2007,13(6):457–461.

[8] 朱进龙,臧建军,曾祥芳, 等.80赖氨酸与70赖氨酸和98赖氨酸对生长肥育猪饲喂效果的比较研究[J].中国畜牧杂志,2014,50(21):27–31.

[9] NIU J,CHEN X,LIN H Z,et al.Comparison of *L*-lysine·HCl and *L*-lysine sulphate in the feed of *Penaeus monodon* and re-evaluation of dietary lysine requirement for *P. monodon*[J].Aquaculture Research,2017,48(1):134–148.

[10] 赵金鑫,李小勤,彭松，等.斑点叉尾鮰对不同形式赖氨酸利用的比较研究[J].水生生物学报,2016,40(1):19–26.

[11] RODEHUTSCORD M,BORCHERT F,GREGUS Z,et al.Availability and utilisation of free lysine in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*):2.Comparison of L-lysine • HCl and *L*-lysine sulphate[J].Aquaculture,2000,187(1/2):177–183.

[12] SMIRICKY-TJARDES M R,MAVROMICHALIS I,ALBIN D M,et al.Bioefficacy of *L*-lysine sulfate compared with feed-grade L-lysine•HCl in young pigs[J].Journal of Animal Science,2004,82(9):2610–2614.

[13] AHMAD G,MUSHTAQ T,MIRZA M A,et al.Comparative bioefficacy of lysine from *L*-lysine hydrochloride or *L*-lysine sulfate in basal diets containing graded levels of canola meal for female broiler chickens[J].Poultry Science,2007,86(3):525–530.

[14] ANDERSON L C,LEWIS A J,PEO E R,Jr.,et al.Effect of various dietary arginine:lysine ratios on performance,carcass composition and plasma amino acid concentrations of growing-finishing swine[J].Journal of Animal Science,1984,58(2):362–368.

[15] ALAM M S,TESHIMA S I,ISHIKAWA M,et al.Effects of dietary arginine and lysine levels on growth performance and biochemical parameters of juvenile Japanese flounder *Paralichthys olivaceus*[J].Fisheries Science,2002,68(3):509–516.

[16] 农业部渔业渔政管理局.中国渔业统计年鉴2016[M].北京:中国农业出版社,2016.

[17] NRC.Nutrient requirements of fish and shrimp[S].Washington,D.C.:National Academies Press,2011.

[18] FENG L,LUO J B,JIANG W D,et al.Changes in barrier health status of the gill for grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) during valine deficiency:regulation of tight junction protein transcript,antioxidant status and apoptosis-related gene expression[J].Fish & Shellfish Immunology,2015,45(2):239–249.

[19] XU H J,JIANG W D,FENG L,et al.Dietary vitamin C deficiency depressed the gill physical barriers and immune barriers referring to Nrf2,apoptosis,MLCK,NF-κB and TOR signaling in grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) under infection of *Flavobacterium columnare*[J].Fish & Shellfish Immunology,2016,58:177–192.

[20] XU H J,JIANG W D,FENG L,et al.Dietary vitamin C deficiency depresses the growth,head kidney and spleen immunity and structural integrity by regulating NF-κB,TOR,Nrf2,apoptosis and MLCK signaling in young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J].Fish & Shellfish Immunology,2016,52:111–138.

[21] GERAYLOU Z,SOUFFREAU C,RURANGWA E,et al.Effects of dietary arabinoxylan-oligosaccharides (AXOS) and endogenous probiotics on the growth performance,non-specific immunity and gut microbiota of juvenile Siberian sturgeon (*Acipenser baerii*)[J].Fish & Shellfish Immunology,2013,35(3):766–775.

[22] HUANG S S Y,STRATHE A B,WANG W F,et al.Selenocompounds in juvenile white sturgeon:evaluating

blood,tissue,and urine selenium concentrations after a single oral dose[J].Aquatic Toxicology,2012,109:158–165.

[23] LIN Y,ZHOU, X Q.Dietary glutamine supplementation improves structure and function of intestine of juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian)[J].Aquaculture,2006,256(1/2/3/4):389–394.

[24] LI S Q,FENG L,JIANG W D,et al.Deficiency of dietary niacin decreases digestion and absorption capacities via declining the digestive and brush border enzyme activities and downregulating those enzyme gene transcription related to TOR pathway of the hepatopancreas and intestine in young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J].Aquaculture Nutrition,2016,22(6):1267–1282.

[25] 唐凌,孙崇岩,邝声耀, 等.晶体色氨酸和包膜色氨酸对幼建鲤生长性能、蛋白质代谢及消化吸收能力影响的比较[J].动物营养学报,2014,26(2):411–419.

[26] NGUYEN L,DAVIS D A.Comparison of crystalline lysine and intact lysine used as a supplement in practical diets of channel catfish (*Ictalurus punctatus*) and Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J].Aquaculture,2016,464:331–339.

[27] WANG S,LIU Y J,TIAN L X,et al.Quantitative dietary lysine requirement of juvenile grass carp *Ctenopharyngodon idella*[J].Aquaculture,2005,249(1/2/3/4):419–429.

[28] GAN L,LIU Y J,TIAN L X,et al.Effects of dissolved oxygen and dietary lysine levels on growth performance,feed conversion ratio and body composition of grass carp,*Ctenopharyngodon idella*[J].Aquaculture Nutrition,2013,19(6):860–869.

[29] LUO Z,LIU Y J,MAI K S,et al.Quantitative *L*﹣lysine requirement of juvenile grouper *Epinephelus coioides*[J].Aquaculture Nutrition,2006,12(3):165–172.

[30] PERES H,OLIVA-TELES A.Lysine requirement and efficiency of lysine utilization in turbot (*Scophthalmus maximus*) juveniles[J].Aquaculture,2008,275(1/2/3/4):283–290.

[31] 刘永坚,田丽霞,刘栋辉, 等.实用饲料补充结晶或包膜赖氨酸对草鱼生长、血清游离氨基酸和肌肉蛋白质合成率的影响[J].水产学报,2002,26(3):252–258.

[32] TOME D.Protein,amino acids and the control of food intake[J].British Journal of Nutrition,2004,92(S1):S27–S30.

[33] RAY A K,GHOSH K,RINGØ E.Enzyme﹣producing bacteria isolated from fish gut:a review[J].Aquaculture Nutrition,2012,18(5):465–492.

[34] 杨威,樊启学,宗克金, 等.鳡幼鱼对晶体氨基酸的利用效果及赖氨酸需求量的研究[J].动物营养学报,2012,24(7):1255–1263.

[35] NAZ M,TÜRKMEN M.Changes in the digestive enzymes and hormones of gilthead seabream larvae (*Sparus aurata*,L.1758) fed on *Artemia* nauplii enriched with free lysine[J].Aquaculture International,2009,17(6):523–535.

[36] LALLÈS J P.Intestinal alkaline phosphatase:novel functions and protective effects[J].Nutrition Reviews,2014,72(2):82–94.

[37] 张继平,林建成,谢进金, 等.草鱼碱性磷酸酶的分离纯化与部分性质研究[J].厦门大学学报:自然科学版,2005,44(5):684–687.

[38] YUAN J,FENG L,JIANG W D,et al.Effects of dietary vitamin K levels on growth performance,enzyme activities and antioxidant status in the hepatopancreas and intestine of juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian)[J].Aquaculture Nutrition,2016,22(2):352–366.

[39] ALMANSA E,SANCHEZ J,COZZI S,et al.Segmental heterogeneity in the biochemical properties of the Na^+-K^+-ATPase along the intestine of the gilthead seabream (*Sparus aurata* L.)[J].Journal of Comparative Physiology B,2001,171(7):557–567.

[40] KOVACS-NOLAN J,RUPA P,MATSUI T,et al.*In Vitro* and *ex vivo* uptake of glutathione (GSH) across the intestinal epithelium and fate of oral GSH after *in vivo* supplementation[J].Journal of Agricultural and Food Chemistry,2014,62(39):9499–9506.

[41] ABDEL-TAWWAB M,AHMAD M H,KHATTAB Y A E,et al.Effect of dietary protein level,initial body weight,and their interaction on the growth,feed utilization,and physiological alterations of Nile tilapia,*Oreochromis niloticus* (L.)[J].Aquaculture,2010,298(3/4):267–274.

[42] JIN M,WANG M Q,HUO Y W,et al.Dietary lysine requirement of juvenile swimming crab,*Portunus trituberculatus*[J].Aquaculture,2015,448:1–7.

[43] 何伟.吡哆醇对幼建鲤消化吸收能力和免疫能力的影响[D].硕士学位论文.雅安:四川农业大学,2008.

[44] 徐静.蛋白对生长中期草鱼生产性能、肠道、机体和鳃健康及肌肉品质的作用及其作用机制[D].硕士学位论文.雅安:四川农业大学,2016.

[45] WU P,LIU Y,JIANG W D,et al.A Comparative study on antioxidant system in fish hepatopancreas and intestine affected by choline deficiency:different change patterns of varied antioxidant enzyme genes and Nrf2 signaling factors[J].PLoS One,2017,12(1):e169888.

[46] 姚仕彬,叶元土,蔡春芳, 等.酵母培养物水溶物对离体草鱼肠道黏膜细胞生长及细胞膜完整性的影响[J].动物营养学报,2014,26(11):3478–3484.

A Comparative Study: Effects of 80% *L*-lysine • H_2SO_4 and 98% *L*-lysine • HCl on Growth Performance, Digestion and Absorption Capacities and Growth Development of Digestive Organs of Young Grass Carp (*Ctenopharyngodon idella*)[2]

HU Kai[1,2]　SU Yuening[1]　FENG Lin[1,3,4]　LIU Yang[1,3,4]　JIANG Weidan[1,3,4]　WU Pei[1,3,4]　JIANG Jun[1,3,4]　ZHOU Xiaoqiu[1,3,4*]

（1. *Animal Nutrition Institute*, *Sichuan Agricultural University*, *Chengdu*, 611130, *China*; 2. *Department of Animal and Veterinary Science*, *Chengdu Agricultural College*, *Chengdu* 611130, *China*; 3. *Fish Nutrition and Safety Production University Key Laboratory of Sichuan Province*, *Sichuan Agricultural University*, *Chengdu* 611130, *China*; 4. *Key Laboratory for Animal Disease-Resistance Nutrition of China Ministry of Education*, *Sichuan Agricultural University*, *Chengdu* 611130, *China*）

Abstract: This study aimed to compare the effects of 80% *L*-lysine • H_2SO_4 (80-lysine) and 98% *L*-lysine • HCl (98-lysine) on growth performance, digestion and absorption capacities and growth development of digestive organs of young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*), to explore the Biological values of 98-lysine and 98-lysine, and to determine the optimum dietary lysine content using 80-Lys as the supplemental form of lysine. A total of 540 grass carp with an initial body weight about 275.80 g were randomly divided into 6 groups with 3 replicates each and 30 fish per replicate. Fish in 6 groups were fed adding 80-lysine diets containing 0.8% (basal diet), 1.0%, 1.2%, 1.4% and 1.6% lysine and adding 98-lysine diet containing 1.2% lysine for 60 d, respectively. The results showed as follows: compared with the basal diet, dietary lysine content reached 1.2% by adding suitable level of 80-lysine could significantly increase the weight gain rate（WGR）, specific growth rate（SGR）, feed intake（FI）, the activities of lipase, amylase in total intestine, the activities of glutamic oxalacetic transaminase （GOT） and glutamate pyruvate transaminase （GPT） in hepatopancreas, the activities of alkaline phosphatase （AKP） and

*Corresponding author, professor, E-mail: zhouxq@sicau.edu.cn　(责任编辑　菅景颖)

creatine kinase （CK）in proximal intestine (PI), mid intestine (MI) and distal intestine (DI), hepatosomatic index （HSI）, intestosomatic index （ISI） and the fold height of PI and DI (P<0.05), and significantly decrease the activities of GOT and GPT in serum (P<0.05); the effects of 80-lysine on these parameters were better than those of 98-lysine (P<0.05). Moreover, compared with the basal diet, dietary lysine content reached 1.2% by adding suitable level of 80-lysine could significantly increase the feed efficiency (FE), total intestine trypsin activity, the activities of Na^+, K^+-ATPase andγ-glutamyltransferase (γ-GT) in PI, MI and DI, intestinal length, relative gut length (RGL) and fold height in MI (P<0.05); however, compared with 98-lysine, no significant effects of 80-lysine were observed on these parameters (P>0.05). In conclusion, 80-lysine is more effective than 98-lysine for improving growth, and digestion and absorption capacities of young grass carp. Using 80-lysine as the supplemental form of lysine, the optimum dietary lysine content for young grass carp (276 to 667 g) base on SGR and FE is 1.31% (4.68% of dietary protein) and 1.27% (4.54% of dietary protein), respectively.

Key words: 80% *L*-lysine •H_2SO_4; 98% *L*-lysine •HCl; grass carp (*Ctenopharyngodon idella*); growth performance; digestion and absorption capacities